离散数学 第 11 回

離散数学 第 11 回
関係 (2)：同値関係

岡本 吉央
okamotoy@uec.ac.jp

電気通信大学

2016 年 7 月 8 日

最終更新：2016 年 7 月 11 日　14:35

スケジュール 前半

- ∗ 休講 (4 月 8 日)
- 1 集合と論理 (1)：命題論理 (4 月 15 日)
- 2 集合と論理 (2)：集合と論理の対応 (4 月 22 日)
- ∗ 昭和の日 (4 月 29 日)
- 3 集合と論理 (3)：述語論理 (5 月 6 日)
- 4 証明法 (1)：∃と∀を含む命題の証明 (5 月 13 日)
- 5 証明法 (2)：含意を含む命題の証明 (5 月 20 日)
- 6 証明法 (3)：集合に関する証明 (5 月 27 日)
- 7 集合と論理 (4)：直積と冪集合 (6 月 3 日)
- • 中間試験 (6 月 10 日)

スケジュール 後半 (予定)

- 8 写像 (1)：像と逆像 (6 月 17 日)
- 9 写像 (2)：全射と単射 (6 月 24 日)
- 10 関係 (1)：関係 (7 月 1 日)
- 11 関係 (2)：同値関係 (7 月 8 日)
- 12 関係 (3)：順序関係 (7 月 15 日)
- 13 証明法 (4)：数学的帰納法 (7 月 22 日)
- 14 集合と論理 (5)：集合の再帰的定義 (7 月 29 日)
- • 期末試験 (8 月 5 日？)

注意：予定の変更もありうる

今日の概要

この講義の目標

- 語学としての数学，コミュニケーションとしての数学

今日の目標

- 同値関係と分割の関係を理解する
  - 分割とは？
  - 分割から同値関係へ
  - 同値関係から分割へ
    - 同値分割と商集合

格言

同値関係は分類のための道具

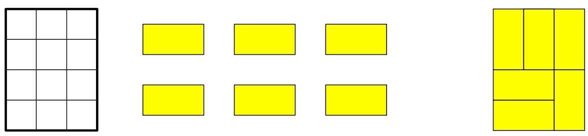
分類：クラスタリング

タイル張り

問題

4×3 の長方形の中に 2×1 の長方形を 6 個敷き詰める方法は全部で何通りあるか？

2×1 の長方形は回転させてもよい

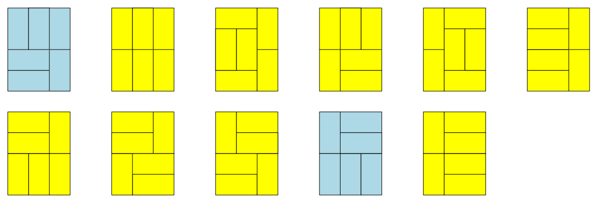


タイル張り

問題

4×3 の長方形の中に 2×1 の長方形を 6 個敷き詰める方法は全部で何通りあるか？

答え：11 個



疑問

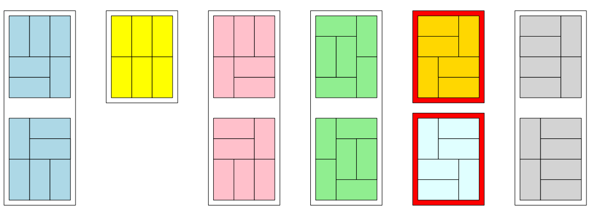
この 2 つは同じものではないのか？

タイル張り (2)

問題

4×3 の長方形の中に 2×1 の長方形を 6 個敷き詰める方法は全部で何通りあるか？ ただし，回転で同じになるものは同じだと見なす

答え：7 個



疑問

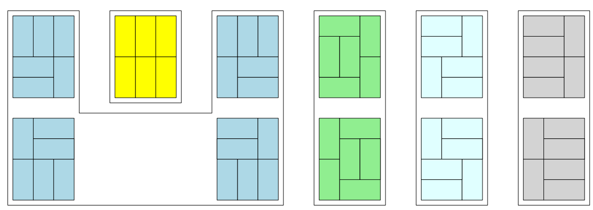
この 2 つは同じものではないのか？

タイル張り (3)

問題

4×3 の長方形の中に 2×1 の長方形を 6 個敷き詰める方法は全部で何通りあるか？ 回転や反転で同じになるものは同じだと見なす

答え：5 個



格言

同値関係は分類のための道具

同値関係

集合 A と A 上の関係 R

同値関係とは？

R が同値関係であるとは，次を満たすこと

- R は反射性を持つ
- R は対称性を持つ
- R は推移性を持つ

- 反射性：任意の $x \in A$ に対して，$x \mathrel{\mathrm{R}} x$
- 対称性：任意の $x, y \in A$ に対して，$x \mathrel{\mathrm{R}} y$ ならば $y \mathrel{\mathrm{R}} x$
- 推移性：任意の $x, y, z \in A$ に対して，$x \mathrel{\mathrm{R}} y$ かつ $y \mathrel{\mathrm{R}} z$ ならば $x \mathrel{\mathrm{R}} z$

同値関係を表す記号

同値関係を表すために，R ではなくて，特別な記号を使うことが多い

同値関係を表す記号の例

- $=$
- $\equiv$
- $\sim$
- $\simeq$
- $\approx$
- $\ldots$

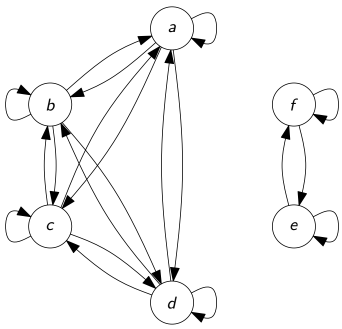
その否定を表す記号の例

- $\neq$
- $\not\equiv$
- $\not\sim$
- $\not\simeq$
- $\not\approx$
- $\ldots$

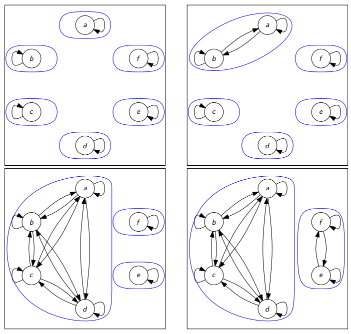
状況に応じて，使い分けられたりする

同値関係をグラフで描くとき...

これが同値関係を表すグラフだとすると？



同値関係が与える「かたまり」への分割



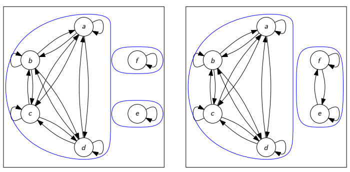
今日の目標

今から行うこと

次を証明する

- 「同値関係」から「『かたまり』への分割」が得られること
- 「『かたまり』への分割」から「同値関係」が得られること

つまり,「同値関係」と「分割」は同じものを別の方法で表現している



目次

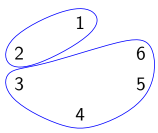
集合の分割

分割とは？

集合 A の分割とは次を満たすような集合 P のこと

- 任意の $X \in P$ に対して，$X \subseteq A$ かつ $X \neq \emptyset$　(非空性)
- 任意の $X, Y \in P$ に対して，$X \neq Y$ ならば $X \cap Y = \emptyset$　(素性)
- 任意の $x \in A$ に対して，ある $X \in P$ が存在して，$x \in X$　(被覆性)

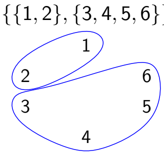
例：$A = \{1,2,3,4,5,6\}$ のとき，$\{\{1,2\},\{3,4,5,6\}\}$ は A の分割



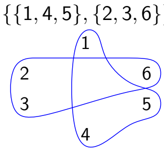
分割とは？: 例 (続き)

次の 4 つはどれも $\{1,2,3,4,5,6\}$ の分割

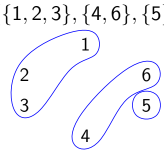
$\{\{1,2\},\{3,4,5,6\}\}$



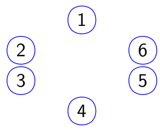
$\{\{1,4,5\},\{2,3,6\}\}$



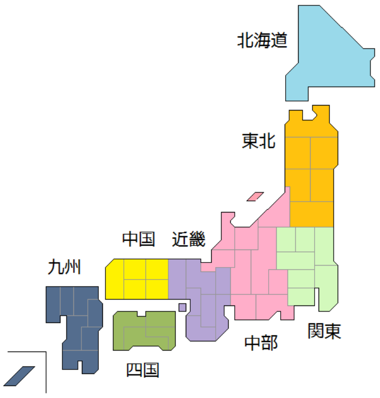
$\{\{1,2,3\},\{4,6\},\{5\}\}$



$\{\{1\},\{2\},\{3\},\{4\},\{5\},\{6\}\}$



分割の例 1：日本の八地方区分



http://www.craftmap.box-i.net/

分割の例 2：カレンダー

1ヵ月の 31 日をいろいろな方法で分割している

日	月	火	水	木	金	土
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

- 1 日 1 日で分割 (31 個の集合へ分割)
  - $\{\{1\},\{2\},\{3\},\{4\},\{5\},\{6\},\{7\},\ldots,\{31\}\}$
- 週ごとに分割 (5 個の集合へ分割)
  - $\{\{1,2,3,4,5,6,7\},\{8,9,10,11,12,13,14\},\ldots\}$
- 曜日ごとに分割 (7 個の集合へ分割)
  - $\{\{1,8,15,22,29\},\{2,9,16,23,30\},\ldots\}$
- ...

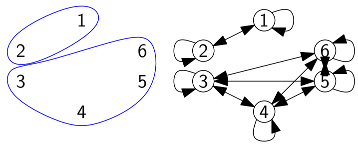
目次

分割から同値関係へ

集合 A の分割 P を考える

分割から同値関係へ

- A 上の関係 R を，任意の $x,y \in A$ に対して $x \mathrel{\mathrm{R}} y$ であることを
  ある $X \in P$ が存在して， $x \in X$ かつ $y \in X$ である
  ことして定義する
- このとき，R は A 上の同値関係である



分割から同値関係へ：証明 (反射性)

証明すべきこと (1)：反射性

任意の $x \in A$ に対して，$x \mathrel{\mathrm{R}} x$

定義に立ち戻って書きなおす

任意の $x \in A$ に対して，ある $X \in P$ が存在して，$x \in X$ かつ $x \in X$

証明：任意の $x \in A$ を考える．

- P は A の分割なので，分割の被覆性から，ある $X \in P$ が存在して，$x \in X$.
- したがって，ある $X \in P$ が存在して $x \in X$ かつ $x \in X$.
- したがって，$x \mathrel{\mathrm{R}} x$. □

分割から同値関係へ：証明 (対称性)

証明すべきこと (2)：対称性

任意の $x,y \in A$ に対して，$x \mathrel{\mathrm{R}} y$ ならば $y \mathrel{\mathrm{R}} x$

定義に立ち戻って書きなおす

任意の $x,y \in A$ に対して，
「ある $X \in P$ が存在して，$x \in X$ かつ $y \in X$」ならば
「ある $X \in P$ が存在して，$y \in X$ かつ $x \in X$」

証明：任意の $x,y \in A$ を考え，$x \mathrel{\mathrm{R}} y$ と仮定する．

- R の定義から，ある $X \in P$ が存在して，$x \in X$ かつ $y \in X$.
- すなわち，ある $X \in P$ が存在して，$y \in X$ かつ $x \in X$.
- したがって，$y \mathrel{\mathrm{R}} x$. □

分割から同値関係へ：証明 (推移性)

証明すべきこと (3)：推移性

任意の $x,y,z \in A$ に対して，$x \mathrel{\mathrm{R}} y$ かつ $y \mathrel{\mathrm{R}} z$ ならば $x \mathrel{\mathrm{R}} z$

証明：任意の $x,y,z \in A$ を考え，$x \mathrel{\mathrm{R}} y$ かつ $y \mathrel{\mathrm{R}} z$ と仮定する．

- R の定義から，ある $X \in P$ が存在して，$x \in X$ かつ $y \in X$.
- 同様に，ある $X' \in P$ が存在して，$y \in X'$ かつ $z \in X'$.
- $y \in X$ と $y \in X'$ から，$y \in X \cap X'$.
- 特に，$X \cap X' \neq \emptyset$.
- 分割の素性から，$X = X'$.
- したがって，$x \in X$ かつ $z \in X$.
- したがって，$x \mathrel{\mathrm{R}} z$. □

目次

同値類

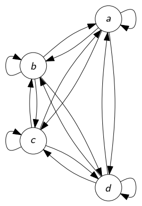
集合 A 上の同値関係 R を考える

同値類とは？

同値関係 R における要素 $a \in A$ の同値類とは

$$\{x \mid x \in A \text{ かつ } a \mathrel{\mathrm{R}} x\}$$

という集合のことであり，これを $[a]_\mathrm{R}$ とも書く



- $[a]_\mathrm{R} = \{a, b, c, d\}$
- $[b]_\mathrm{R} = \{a, b, c, d\}$
- $[c]_\mathrm{R} = \{a, b, c, d\}$
- $[d]_\mathrm{R} = \{a, b, c, d\}$
- $[e]_\mathrm{R} = \{e, f\}$
- $[f]_\mathrm{R} = \{e, f\}$

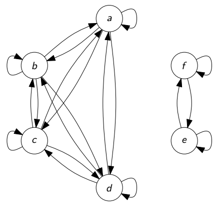
商集合

商集合とは？

集合 A 上の同値関係 R に対して，

$$A / \mathrm{R} = \{[a]_\mathrm{R} \mid a \in A\}$$

を R に関する A の商集合と呼ぶ．



$$\begin{aligned} A / \mathrm{R} &= \{[a]_\mathrm{R}, [b]_\mathrm{R}, [c]_\mathrm{R}, [d]_\mathrm{R}, [e]_\mathrm{R}, [f]_\mathrm{R}\} \\ &= \{\{a, b, c, d\}, \{e, f\}\} \end{aligned}$$

注意

商集合 A / R を $\dfrac{A}{\mathrm{R}}$ とは書かない

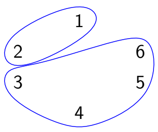
同値関係から分割へ

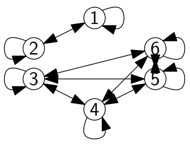
集合 A 上の同値関係 R を考える

同値関係から分割へ

商集合 A / R は A の分割である

これゆえ，R に関する A の商集合のことを，
R に関する A の同値分割とも呼ぶ





同値関係から分割へ：証明への道筋

分割の定義に立ち戻って書き換える

証明すべきこと (1)：非空性

任意の $X \in A / \mathrm{R}$ に対して，$X \subseteq A$ かつ $X \neq \emptyset$

証明すべきこと (2)：素性

任意の $X, Y \in A / \mathrm{R}$ に対して，$X \neq Y$ ならば $X \cap Y = \emptyset$.

証明すべきこと (3)：被覆性

任意の $x \in A$ に対して，ある $X \in A / \mathrm{R}$ が存在して，$x \in X$

この 3 つが証明できれば，A / R が A の分割であることが言える

同値関係から分割へ：証明 (非空性)

証明すべきこと (1)：非空性

任意の $X \in A / \mathrm{R}$ に対して，$X \subseteq A$ かつ $X \neq \emptyset$

証明：任意の $X \in A / \mathrm{R}$ を考える．
- 商集合の定義から，ある $a \in A$ が存在して，$X = [a]_\mathrm{R}$.
- 同値類の定義から，$[a]_\mathrm{R} \subseteq A$.
- したがって，$X \subseteq A$.

- 同値関係の反射性から，$a \mathrel{\mathrm{R}} a$.
- 同値類の定義から，$a \in [a]_\mathrm{R}$.
- したがって，$[a]_\mathrm{R} \neq \emptyset$.
- したがって，$X \neq \emptyset$. □

同値関係から分割へ：証明 (素性)

証明すべきこと (2)：素性

任意の $X, Y \in A / \mathrm{R}$ に対して，$X \neq Y$ ならば $X \cap Y = \emptyset$.

証明：任意の $X, Y \in A / \mathrm{R}$ を考える．
- 対偶を証明するために，$X \cap Y \neq \emptyset$ を仮定する． .... (1)
- 商集合の定義から，ある $a \in A$ が存在して，$X = [a]_\mathrm{R}$.
- 同様に，ある $a' \in A$ が存在して，$Y = [a']_\mathrm{R}$.
- 仮定 (1) より，ある $x \in A$ が存在して，$x \in X$ かつ $x \in Y$.
- すなわち，$x \in [a]_\mathrm{R}$ かつ $x \in [a']_\mathrm{R}$.
- 同値類の定義から，$a \mathrel{\mathrm{R}} x$ かつ $a' \mathrel{\mathrm{R}} x$.
- $a' \mathrel{\mathrm{R}} x$ と同値関係の対称性から，$x \mathrel{\mathrm{R}} a'$.
- $a \mathrel{\mathrm{R}} x$，$x \mathrel{\mathrm{R}} a'$ と同値関係の推移性から，$a \mathrel{\mathrm{R}} a'$.
- $a \mathrel{\mathrm{R}} a'$ から，$[a]_\mathrm{R} = [a']_\mathrm{R}$. (演習問題)
- したがって，$X = Y$.
- したがって，$X \neq Y$ ならば $X \cap Y = \emptyset$. □

同値関係から分割へ：証明 (被覆性)

証明すべきこと (3)：被覆性

任意の $x \in A$ に対して，ある $X \in A / \mathrm{R}$ が存在して，$x \in X$

証明：任意の $x \in A$ を考える．
- $X = [x]_\mathrm{R}$ とする．
- 反射性から，$x \mathrel{\mathrm{R}} x$.
- 同値類の定義から，$x \in [x]_\mathrm{R}$.
- したがって，$x \in X$. □

目次

今日のまとめ

この講義の目標

- 語学としての数学，コミュニケーションとしての数学

今日の目標

- 同値関係と分割の関係を理解する
  - 分割とは？
  - 分割から同値関係へ
  - 同値関係から分割へ
    - 同値分割と商集合

格言

本質的に同一であるものが，異なる表現を持つことはよくある

同値関係	分割
局所的 (local)	大域的 (global)
微視的 (micro)	巨視的 (macro)